

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN EN FRECUENCIA DE LA  
PROPAGACIÓN DEL OLEAJE HACIA LA COSTA Y LA PENETRACIÓN DE  
ONDAS DE INFRAGRAVEDAD AL INTERIOR DE LA LAGUNA CÁHUIL**

**RODRIGO CIENFUEGOS C.**<sup>1,2</sup>  
**JOSÉ GALAZ M.**<sup>1,2</sup>  
**ERNESTO BERTELSEN**<sup>1,2</sup>  
**PATRICIO A. CATALÁN M.**<sup>3,2</sup>  
**MARICARMEN GUERRA P.**<sup>4,2</sup>  
**RAÚL FLORES A.**<sup>3,2</sup>  
**FELIPE LUCERO**<sup>5</sup>

**RESUMEN**

En este artículo exploramos las potencialidades de un método de percepción remota basado en imágenes de video para estudiar la evolución en frecuencia del oleaje incidente a la costa y la penetración de ondas de infragravedad en la Laguna Cáhuil. Los datos analizados corresponden a la mañana del 2 de agosto de 2023, durante un ciclo de marea llenante y bajo condiciones de un *swell* incidente energético. Se establece que el método desarrollado permite caracterizar correctamente la frecuencia del *swell* incidente, la modulación temporal del punto de rompimiento, y el proceso de transformación del oleaje al propagarse hacia el interior de la laguna. Se caracteriza el efecto de filtro pasa bajo que ejerce la boca del estuario al eliminar casi completamente las frecuencias del *swell*, dejando pasar solamente las ondas largas en el rango de frecuencias de infragravedad. Como recientemente se ha establecido en la literatura científica que la penetración de ondas de infragravedad en este tipo de estuarios puede tener implicancias en los procesos de transporte y mezcla que se producen en ellos, el uso de herramientas de percepción remota como las estudiadas en este trabajo, podría entregar nuevos elementos para el estudio de estos procesos.

---

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile

<sup>2</sup> Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN/ANID/Fondap/15110017)

<sup>3</sup> Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María

<sup>4</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción

<sup>5</sup> Marine Energy Research and Innovation Center (MERIC)

## 1. INTRODUCCIÓN

Las desembocaduras son transiciones entre ambientes fluviales y costeros moldeadas por procesos hidrológicos y marinos que dan origen a configuraciones geomorfológicas y ecosistémicas de gran diversidad (Boyd et al., 1992). En particular, en latitudes medias con climas mediterráneos y bajo condiciones micro mareales dominadas por oleaje, las desembocaduras pueden abrirse y cerrarse de manera intermitente en ciclos de invierno-verano. En la última década, estos sistemas conocidos en la literatura como estuarios intermitentemente abiertos/cerrados (IOCE por sus siglas en inglés), han tenido mayor atención social y científica debido a su importancia ambiental, capacidades de mitigación de inundaciones y relevancia cultural (McSweeney et al., 2017; Thorne et al., 2021; Mayjor et al., 2023; Khojasteh et al., 2025). Lo anterior también se explica debido a alteraciones recientes de los ciclos naturales asociados al cambio climático y a una expansión urbana acelerada; en muchos sitios, esta situación está requiriendo intervenciones artificiales para reducir el riesgo de inundación y cuidar la salud de los humedales que se forman en su desembocadura (McSweeney et al., 2020; GEF, 2021).

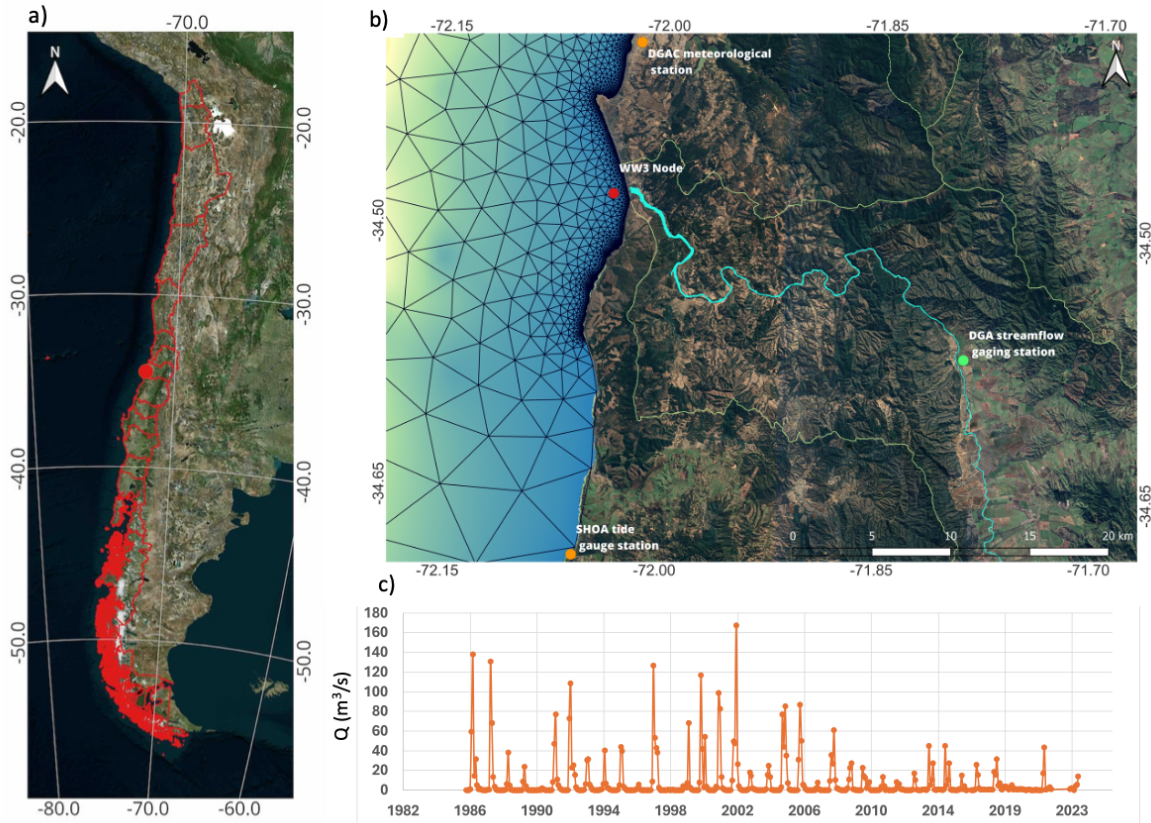
Las brechas críticas de conocimiento y gestión para estos sistemas, requieren aumentar las capacidades de monitoreo. En particular, dada la evolución continua y dinámica de estos ambientes, es necesario disponibilizar datos espacio-temporales de alta resolución para lograr una comprensión efectiva de su funcionamiento, donde el uso de sistemas de teledetección ha abierto nuevas oportunidades para comprender estos procesos (Vos et al., 2019; Nichols et al., 2019). Estudios de terreno recientes han evidenciado que bajo ciertas condiciones, el oleaje incidente de periodos entre 2 s y 25 s transfiere energía hacia ondas de infragravedad (IG) de periodos entre 25 s y 250 s (e.g. Sheremet et al., 2002) capaces de propagarse al interior de los IOCE (Williams et al., 2016; McSweeney et al., 2020; Cienfuegos 2023). Los efectos que este tipo de ondas pueden tener sobre estos ecosistemas no han sido bien cuantificados, pero se ha podido establecer su importancia, por ejemplo, en los procesos de transporte y mezcla al interior de estuarios (e.g. Bertin et al., 2019; Mendes et al., 2020; Wheeler et al., 2025).

En el marco del desarrollo e implementación del Sistema de Monitoreo y Anticipación de la Resiliencia Costera (SIMONA Costa; Cienfuegos et al., 2023), hemos observado procesos de generación de ondas IG a partir de *swells* energéticos y la posterior penetración de éstas en la Laguna Cáhuil ubicada en la Región de O'Higgins. Este sitio constituye el punto de salida de la cuenca del estero Nilahue que puede alternar entre un estuario con conexión al mar en periodos lluviosos, y laguna costera desconectada del océano en periodos secos, con la formación de una barra de arena en su desembocadura. Este sitio cumple entonces con las características para ser clasificado como IOCE.

En este trabajo presentamos un método de percepción remota basado en el análisis de imágenes de video para caracterizar la generación de ondas IG a partir del *swell* incidente, y su penetración hacia el estuario. El sitio de estudio, los materiales y métodos, y los análisis y hallazgos iniciales se resumen en las siguientes secciones.

## 2. SITIO DE ESTUDIO

El sitio de estudio está ubicado en la costa del Pacífico central de Chile ( $34.48^{\circ}\text{S}$ ,  $72.00^{\circ}\text{W}$ ; Fig. 1-a), en la desembocadura de la cuenca del estero Nilahue que drena un área aproximada de  $1.700\text{ km}^2$  desde la Cordillera de la Costa. La escorrentía promedio anual es de  $9,8\text{ m}^3/\text{s}$  alcanzando valores máximos en los meses invernales entre junio y septiembre y valores prácticamente nulos de escorrentía en los meses de verano (GORE, 2023). En el periodo invernal las precipitaciones pueden generar pulsos de crecida fluvial aumentando el caudal del estero, inundando las planicies aledañas (GEF, 2021).



**Fig. 1.** Sitio de estudio en Laguna Cáhuil. a) Ubicación general en la zona central de Chile (punto rojo) y límites regionales (líneas rojas). b) Parte baja de la cuenca del Estero Nilahue (cauce principal coloreado en celeste), malla utilizada para generar el clima espectral de oleaje frente a la desembocadura (triángulos negros y punto de salida WW3 node), además de las estaciones de observación de mareas (SHOA), meteorológica (DGAC) y caudales (DGA). c) Caudales medios mensuales medidos en la estación Santa Teresa de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas (estación DGA en la figura b).

En la desembocadura del estero, se forma una laguna poco profunda con una barra de arena en la salida al mar, típico de sistemas IOCE (Fig. 2). Está expuesta a oleajes energéticos que provienen predominantemente del SW-SSW y experimenta condiciones micro mareales. Las características hidrológicas y oceanográficas promedio se resumen en la Tabla 1. Los datos de oleaje se obtienen a partir de un *Hindcast* en un nodo ubicado frente a la desembocadura a 18 m de profundidad (Fig. 1-b) utilizando el modelo WW3 v6.0748 (Tolman, 2019). En la última década, el centro de Chile ha sufrido sequías prolongadas (CR2, 2020), lo que ha

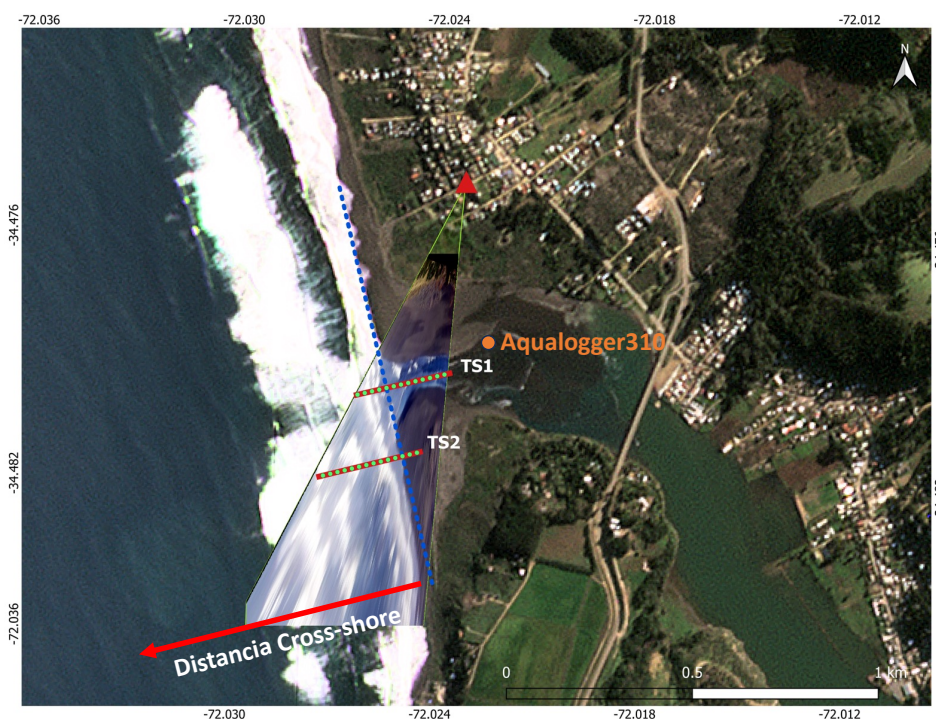
resultado en una reducción de las descargas medias del flujo del estero, como se evidencia en la Fig. 1-c.

**Tabla 1.** Características hidrológicas y oceanográficas de la cuenca del estero Nilahue en su desembocadura.  
Fuente: elaboración propia y GORE (2023).

Área de drenaje y cota máxima de la cuenca	Rango Mareal	Descarga Promedio Anual del estero	Caudal de crecida de 2 años de periodo de retorno	Altura de ola significativa media anual y periodo <i>peak</i>
1.700 km <sup>2</sup> 900 msnm	1-2 m	9,8 m <sup>3</sup> /s	148 m <sup>3</sup> /s	2,5 m 13 s

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

La dinámica de la desembocadura del estero se captura mediante la estación de monitoreo de video de alta resolución, que forma parte de SIMONA Costa (Cienfuegos et al., 2023). El sistema de adquisición comprende un micro controlador (Raspberry Pi 4) y una cámara de 12.3 megapíxeles (Raspberry Pi HQ), que utiliza un sensor Sony IMX477 junto con una lente Arducam de distancia focal de 16 mm. La calibración de la cámara y la orto-rectificación se llevan a cabo siguiendo (Holland et al., 1997), utilizando la biblioteca OpenCV (Bradski, 2000), con 58 puntos de control terrestre obtenidos con un sistema GPS Trimble R3, todos referenciados al dato local. El sistema captura de manera automática videos de 20 minutos cada hora entre las 08:00 hrs y las 18:00 hrs a una velocidad de 7 fps. El campo de visión de la cámara se presenta en la Fig. 2.



**Fig. 2.** Ubicación de la cámara SIMONA Costa (triángulo rojo) y la proyección de su imagen geo-referenciada. La ubicación del sensor de presión Aqualogger310 se muestra en un punto naranja. TS1 y TS2 son los segmentos perpendiculares a la costa donde se

construyen los diagramas espacio-tiempo (Hövmoller) de las olas incidentes. Vista satelital tomada el 1 de agosto de 2023 (<https://www.planet.com/>).

Las imágenes del fotograma extraído del video se rectifican y se definen dos transectos perpendiculares a la costa (TS1 y TS2 en la Fig. 2) para la caracterización del oleaje incidente y su transformación espacio-temporal. Se define el transecto TS1 para observar la penetración de ondas hacia la Laguna Cáhuil, mientras que el transecto TS2 sirve para caracterizar el oleaje que incide sobre la playa (Fig. 2). Cada transecto tiene una extensión aproximada de 200 m, donde la referencia cero para las distancias *cross-shore* se ubica en la línea de costa. En estos transectos se obtienen diagramas de Hövmoller espacio-tiempo con una resolución aproximada de 0,3 metros por píxel.

Las frecuencias de las olas que alcanzan la costa y entran en la laguna se caracterizan utilizando estos diagramas donde se mide la intensidad óptica de los píxeles sobre los transectos. Se analiza una serie de video obtenida el día 2 de agosto de 2023 en condiciones de marea llanante (a partir de las 8:00 hrs). Para cada posición en el transecto, se considera un total de 158.046 píxeles muestreados a 7 Hz (casi 376 minutos en total). Los píxeles RGB son convertidos a binarios (blanco y negro) para facilitar el postproceso e identificación ola a ola. Además, se define para cada posición en el espacio, la intensidad de pixel normalizada como,

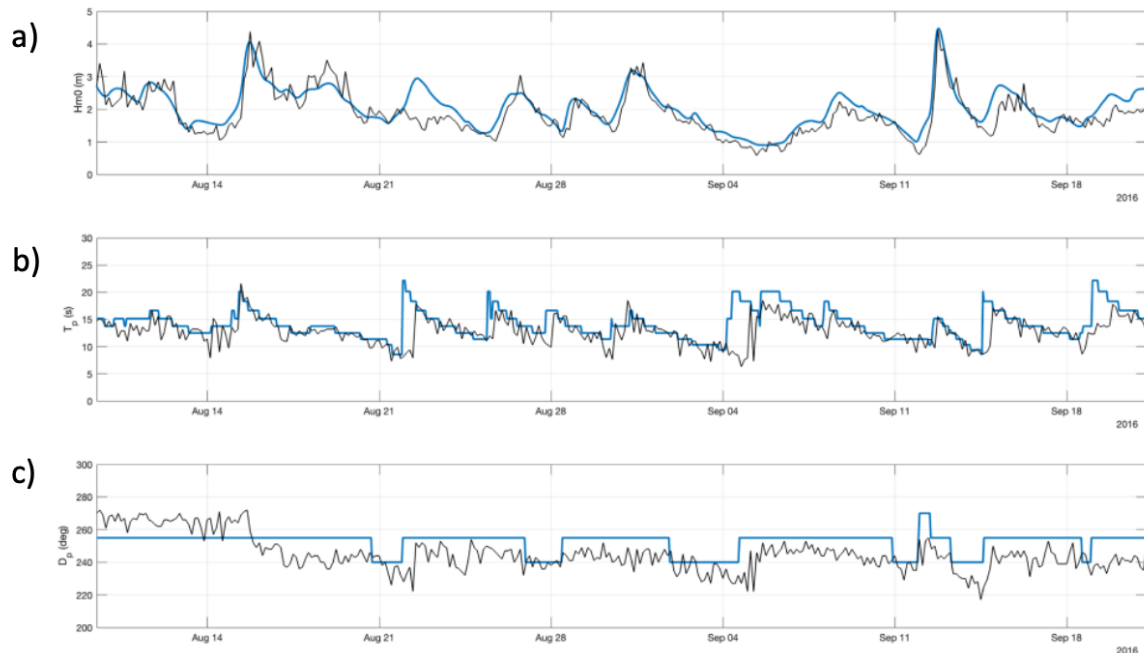
$$P_n(x, t) = \frac{P(x,t) - \mu_P(x)}{\sigma_P(x)} \quad (1)$$

donde  $P(x, t)$  es el valor binario del pixel ubicado en la posición  $x$  en el instante  $t$ ,  $\mu_P(x)$  y  $\sigma_P(x)$  son respectivamente el promedio y la desviación estándar de la serie de tiempo.

Las series de tiempo así normalizadas se tratan con un filtro Butterworth pasa banda de orden 4 (Winder, 2002) con frecuencias de corte entre 0,001 Hz (16 min) y 1 Hz (1 s) para eliminar el ruido de alta frecuencia y las variaciones más largas que pudieran estar influidas por procesos distintos a los que se quieren estudiar. Para caracterizar la distribución en frecuencia del oleaje incidente, se usa el método de Welch promediando ventanas de Hanning de 4.096 puntos en el tiempo (aproximadamente 10 minutos) con una superposición entre ventanas del 50%. De esta forma se estima la Potencia de Densidad Espectral (PSD por sus siglas en inglés) de la serie de píxeles normalizada.

Para estimar las condiciones de oleaje incidente y verificar que el método de percepción remota captura correctamente las frecuencias del *swell* observado durante la campaña de terreno, comparamos los resultados con las estimaciones de clima de oleaje en modo *Hindcast* obtenidas del modelo de propagación espectral WW3 v6.0748 (Tolman, 2019) con una configuración que ha sido previamente validada en las condiciones oceánicas chilenas (Lucero et al., 2017; Mazzaretto et al., 2020; Lucero et al., 2023). El modelo se establece sobre una malla global de resolución de 0,5° y una malla no estructurada anidada de 9.869 nodos que comienza a una profundidad cercana a los 2.000 m. La malla anidada aumenta paulatinamente su resolución al acercarse a la costa, hasta tener triángulos de lado aproximado de 50 m (Fig. 1-b). Las salidas del modelo se validan con datos de un ADCP fondeado a una profundidad de 18 m por la Dirección de Obras Portuarias (DOP) del Ministerio de Obras

Públicas (MOP) entre agosto y septiembre de 2016. Se considera que el modelo representa correctamente el clima de oleaje medido, presentando diferencias medias en el valor de las alturas de ola significativa (Fig. 3-a), los períodos *peak* (Fig. 3-b) y las direcciones *peak* (Fig. 3-c) de 0,2 m, 1 s y 7°, respectivamente.



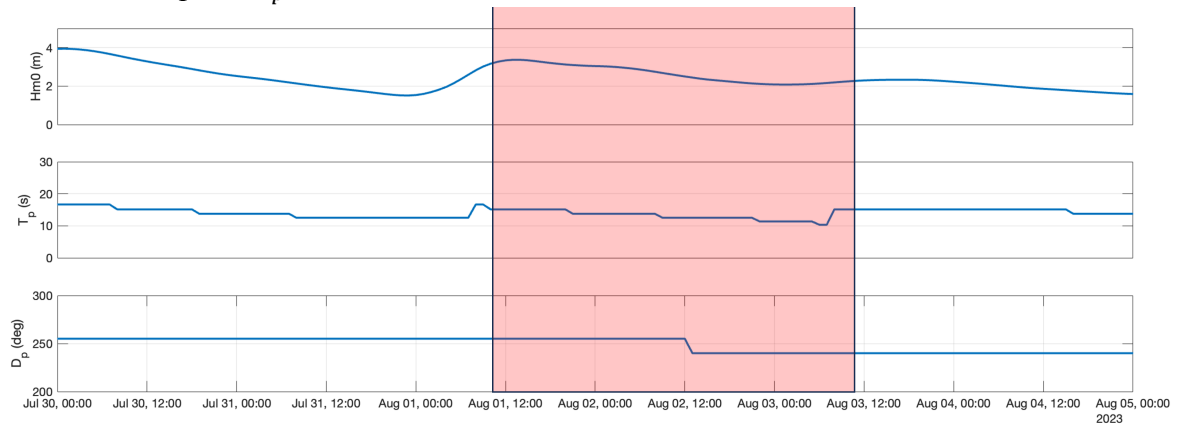
**Fig. 3.** Validación de las estimaciones del clima de oleaje obtenidas a partir del modelo espectral WW3 contrastando sus resultados con mediciones ADCP realizadas por la Dirección de Obras Portuarias (DOP) a una profundidad de 18 m frente a la desembocadura del estero Nilahue entre agosto y septiembre de 2016. Las series de tiempo medidas y modeladas se representan en líneas azules y negras, respectivamente. a) Altura de ola significativa. b) Período *peak*. c) Dirección *peak*.

Finalmente, para verificar las estimaciones remotas de las frecuencias de las olas que logran penetrar hacia la Laguna Cáhuil, se utilizan las mediciones de presión obtenidas desde un sensor Aqualogger310 instalado a una profundidad media de 0,4 m cerca de la entrada de la laguna (Fig. 2). Se utilizan datos registrados a una frecuencia de 1 Hz durante la llenante coincidente con las observaciones de video. La serie de tiempo de presión se transforma primero en profundidad utilizando la reconstrucción no-hidroestática y no-lineal de Bonneton et al. (2018) considerando una masa específica  $\rho = 1020 \text{ kg/m}^3$ . La señal resultante se procesa con un filtro Butterworth pasa alto de orden 4 (Winder, 2002) con una frecuencia de corte de 0,001 Hz (16 min) para descartar variaciones más largas asociadas a procesos distintos a los que se quieren estudiar. Se estima un espectrograma normalizado utilizando la transformada continua de ondícula de Morlet siguiendo la implementación de Grinsted et al. (2004) disponible en <https://grinsted.github.io/wavelet-coherence/>.

#### 4. RESULTADOS

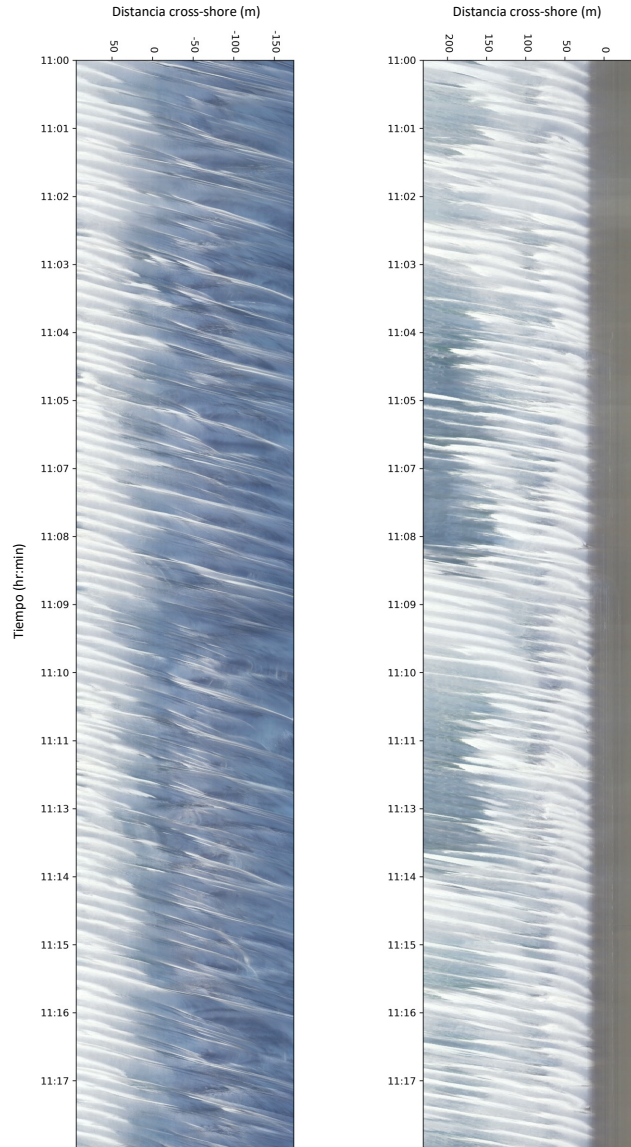
El modelo WW3 permite caracterizar el clima de oleaje incidente en el momento en que realizamos las mediciones de campo. En la Fig. 4 se observa que el día 2 de agosto de 2023,

el *swell* incidente tenía una altura significativa  $H_{m0} \approx 2,5$  m, un periodo *peak*  $T_p \approx 13$  s, y una dirección *peak*  $D_p \approx 250^\circ$ , casi normal a la costa.



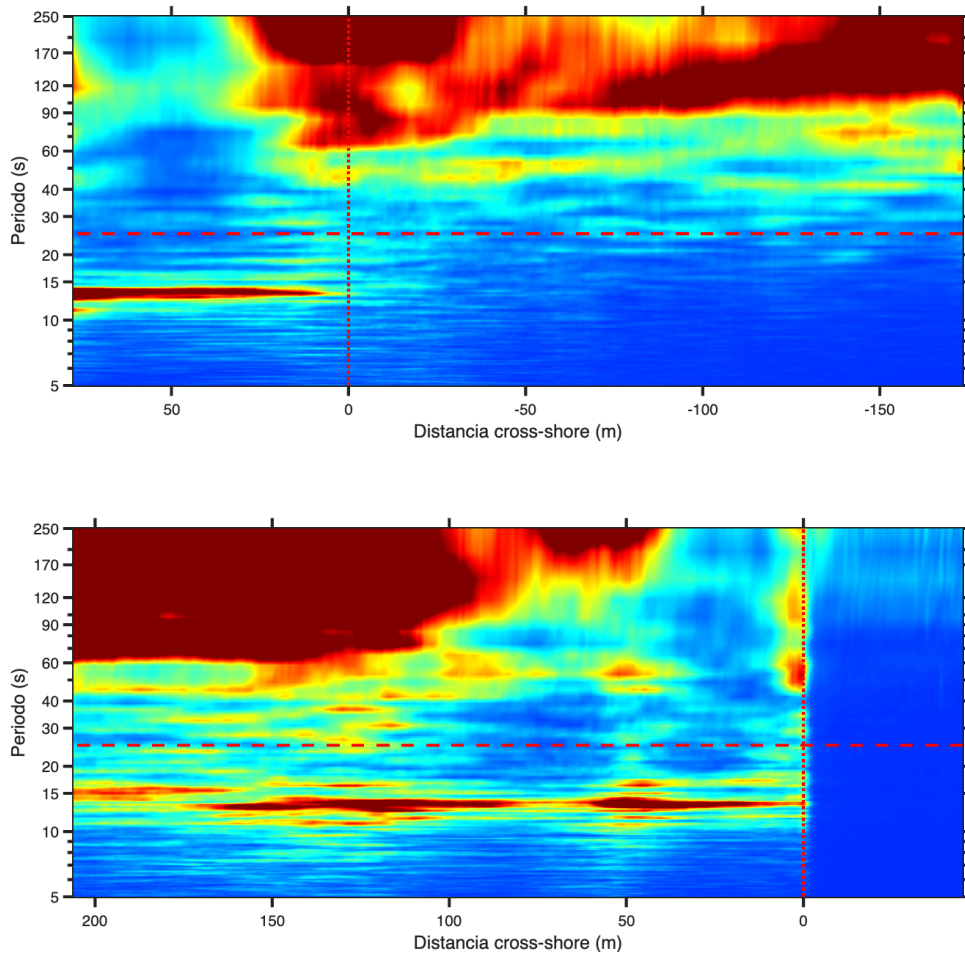
**Fig. 4.** Clima de oleaje modelado en los días cercanos a los datos de campo analizados. En el rectángulo coloreado se muestra el periodo en que se instalaron instrumentos en la laguna. Panel superior: Altura significativa. Panel del medio: Periodo *peak*. Panel inferior: Dirección *Peak*.

La captura de las ondas incidentes propagándose a través de los transectos TS1 y TS2 se ejemplifica en los diagramas Hövmoller representados en la Fig. 5. Se observan las trayectorias de las rompientes (espuma blanca) hacia el canal de la desembocadura y la playa con periodos bastante regulares a una distancia  $x \approx 100$  m aguas afuera de la costa. Para el transecto TS2, se observa claramente la oscilación del punto de rompimiento aguas afuera, dando cuenta de una modulación de periodo más largo responsable de generar ondas IG (*surf beat*; Symonds et al., 1982). Por otro lado, se aprecia que no todas las rompientes que inciden logran penetrar hacia la laguna (TS1) confirmando el efecto de filtro pasa bajo de la boca del estuario que ha sido reportado previamente (Williams et al., 2016; McSweeney et al., 2020; Cienfuegos, 2023).



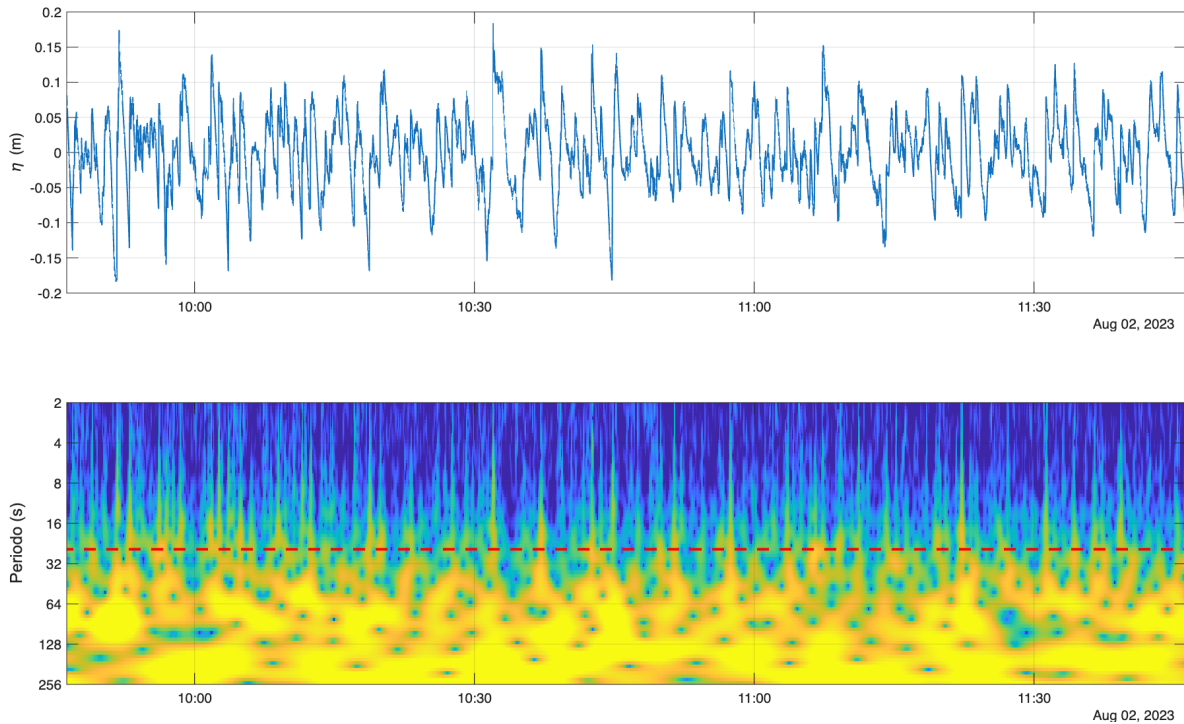
**Fig. 5.** Diagramas Hövmoller para el oleaje propagándose a través del transecto TS1 (panel izquierdo) ubicado en la boca del estuario, y a través del transecto TS2 (panel derecho) ubicado en la playa.

Para cuantificar las frecuencias de las ondas incidentes, en la Fig. 6 se presenta la distribución espacial de las PSD para cada transecto. En el rango de las ondas de gravedad, ambos transectos muestran la firma espectral del *swell* incidente aguas afuera ( $x > 0$  m) con un periodo *peak*  $T_p \approx 13$  s. Este periodo es consistente con el calculado para las condiciones de oleaje en ese momento por el modelo WW3 (Fig. 4). En el rango de frecuencias de ondas IG se cuantifican las oscilaciones asociadas al punto de rompimiento aguas afuera en el TS2, mientras que en el TS1 se observa como las frecuencias del *swell* desaparecen en la entrada del canal ( $x < 0$  m), dando lugar a pulsaciones en el rango de las ondas IG.



**Fig. 6.** Evolución espacial de la distribución en frecuencia de las ondas incidentes al propagarse hacia la costa. Panel superior: Transecto TS1 a la entrada de la laguna. Panel inferior: Transecto TS2 en la playa. La línea vertical punteada indica la posición de la línea de costa ( $x = 0$  m), mientras que la línea segmentada horizontal marca la separación entre ondas de gravedad y ondas de infragravedad (25 s).

La señal medida por el sensor de presión ubicado al interior de la laguna se presenta en el panel superior de la Fig. 7. Se observan ondas de amplitudes máximas cercanas a los 0,2 m y periodos mucho más largos que el asociado al *swell*, confirmando entonces que las ondas que logran penetrar al interior de la laguna tienen periodos en el rango de las ondas IG. Para verificar lo anterior se presenta el espectrograma asociado a la señal en el panel inferior de la misma figura. Los periodos dominantes en la señal pertenecen al rango de ondas IG, en concordancia con los periodos estimados a partir de la señal de video dando cuenta de la capacidad de capturar la evolución en frecuencia de las ondas incidentes a partir del método.



**Fig. 7.** Señal de profundidad medida a la entrada de la laguna. Panel superior: Serie de tiempo procesada con un filtro pasa alto de frecuencia de corte de 0,001 Hz (16 min). Panel inferior: Evolución temporal de la distribución de energía en la frecuencia. La línea segmentada horizontal marca la separación entre ondas de gravedad y ondas de infragravedad (25 s).

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se estudiaron las potencialidades que tiene el sistema de monitoreo basado en imágenes de video que se encuentra operando en la Laguna Cáhul para caracterizar las condiciones de oleaje incidente. En particular se desarrolló un método para analizar las imágenes de video registradas a 7 fps y estudiar a partir de ellas la evolución en frecuencia del *swell* incidente y la penetración de olas a la laguna. Se utilizan datos de oleaje modelados y mediciones de un sensor de presión instalado al interior de la laguna para contrastar las estimaciones obtenidas por el método de percepción remota. Los datos analizados corresponden a la mañana del 2 de agosto de 2023, durante un ciclo de marea llenante y bajo condiciones de un *swell* incidente energético. Se pudo observar y caracterizar correctamente la frecuencia del *swell* incidente con un periodo *peak* cercano a los 13 s. El método además permite caracterizar la modulación temporal del punto de rompimiento, mecanismo de generación de ondas de infragravedad conocido como *surfbeat*. El proceso de transformación del *swell* incidente al propagarse hacia el interior de la laguna también es capturado correctamente, dando cuenta del efecto de filtro pasa bajo que ejerce la boca del estuario, al eliminar casi completamente el oleaje en las frecuencias del *swell*, dejando pasar solamente las ondas largas en el rango de frecuencias de infragravedad. Las frecuencias de ondas largas que el sistema de video pudo detectar se comparan favorablemente con las mediciones directas obtenidas por el sensor de presión al interior de la laguna. Recientemente se ha establecido en la literatura científica que la penetración de ondas de infragravedad en este tipo de estuarios puede tener implicancias en los procesos de transporte y mezcla que se

producen en ellos, pero sus efectos son de difícil cuantificación. El uso de herramientas de percepción remota como las estudiadas en este trabajo, podría entregar nuevos elementos para el estudio de estos procesos.

## AGRADECIMIENTOS

El trabajo realizado ha contado con el apoyo y financiamiento de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), a través de los programas ANID/FONDEF/ID22110087, centro de excelencia FONDAP CIGIDEN ANID/Fondap/1522A0005 y el proyecto FONDECYT 1231494, y el centro MERIC 14CEI2-28228. Se ha contado además, para desarrollar el proyecto, con el apoyo fundamental del Ministerio del Medio Ambiente, del programa GEF Humedales Costeros de la Zona Centro Sur de Chile, de la Fundación Punta de Lobos, del Hotel Alaia y de las Cabañas Piedra Grande.

## REFERENCIAS

Boyd, R., Dalrymple, R., Zaitlin, B. A.: Classification of clastic coastal depositional environments. *Sedimentary Geology*, 80(3-4), 139-150 (1992).

Bertin, X., Mendes, D., Martins, K., Fortunato, A. B., & Lavaud, L. (2019). The closure of a shallow tidal inlet promoted by infragravity waves. *Geophysical Research Letters*, 46(12), 6804-6810.

Bonneton, P., Lannes, D., Martins, K. & Michallet, H. A nonlinear weakly dispersive method for recovering the elevation of irrotational surface waves from pressure measurements. *Coastal Engineering* 138, 1–8 (2018).

Bradski, G.: The OpenCV Library. *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*, 120; 122-125 (2000).

Cienfuegos, R. Surfing waves from the ocean to the river with the Serre-Green-Naghdi equations. *Journal of Hydraulic Engineering* 149, 04023032 (2023).

Cienfuegos, R., Lucero, F., Catalán, P., Martínez, C., Díaz, P., y Caravaca, L. 2023. Sistema de monitoreo y anticipación de la resiliencia costera – SIMONA COSTA. *XXVI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID), Santiago, Chile.

CR2: La Megasequía 2010-2019: Una lección para el futuro. Informe a las naciones, Centro del Clima y la Resiliencia (CR2), (2020).

GEF – Global Environment Facility. (2021). Propuesta de delimitación del humedal Laguna de Cahuil e identificación de áreas prioritarias a restaurar en su cuenca aportante (Informe final, Proyecto GEFSEC ID: 9766).

GORE - Gobierno Regional Región de O'Higgins. (2023). Estudio de inundabilidad en el humedal de Cahuil, comuna de Pichilemu, Región de O'Higgins (ID: 4374-14-LQ21). Informe Final. Mayo.

- Grinsted, A., Moore, J. C. & Jevrejeva, S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics* 11, 561–566 (2004).
- Holland, K. T., Holman, R. A., Lippmann, T. C., Stanley, J. & Plant, N. Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 22, 81–92 (1997).
- Khojasteh, D., Rao, S., McSweeney, S., Ibaceta, R., Nicholls, R. J., French, J., ... & Hanslow, D. (2025). Intermittent estuaries deserve global attention as vulnerable and vital ecosystems. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 443.
- Lucero, F. et al. Wave energy assessment in the central-south coast of Chile. *Renewable Energy* 114, 120–131 (2017).
- Lucero, F., Stringari, C. E., & Filipot, J. F. (2023). Improving WAVEWATCH III hindcasts with machine learning. *Coastal Engineering*, 185, 104381.
- Mayjor, M., Reichelt-Brushett, A. J., Malcolm, H. A., Page, A.: Water quality fluctuations in small intermittently closed and open lakes and lagoons (ICOLLs) after natural and artificial openings. *Estuarine, coastal and shelf science*, 281, 108208 (2023).
- Mazzaretto, O. M., Lucero, F., Besio, G. & Cienfuegos, R. Perspectives for harnessing the energetic persistent high swells reaching the coast of Chile. *Renewable Energy* 159, 494–505 (2020).
- McSweeney, S. L., Kennedy, D. M., Rutherford, I. D., Stout, J. C.: Intermittently Closed/Open Lakes and Lagoons: Their global distribution and boundary conditions. *Geomorphology*, 292, 142-152 (2017).
- McSweeney, S. L., Stout, J. C. & Kennedy, D. M. Variability in infragravity wave processes during estuary artificial entrance openings. *Earth Surface Processes and Landforms* 45, 3414–3428 (2020).
- Mendes, D., Fortunato, A. B., Bertin, X., Martins, K., Lavaud, L., Silva, A. N., ... & Pinto, J. P. (2020). Importance of infragravity waves in a wave-dominated inlet under storm conditions. *Continental Shelf Research*, 192, 104026.
- Nichols C.R., Wright, L.D., Bainbridge S.J., Cosby A., Hénaff A., Loftis J.D., Cocquempot L., Katragadda S., Mendez G.R., Letortu P., Le Dantec N., Resio D., Zarillo G.: Collaborative science to enhance coastal resilience and adaptation. *Frontiers in Marine Science*, 6, 404 (2019).
- Thorne, K. M., Buffington, K. J., Jones, S. F., Largier, J. L.: Wetlands in intermittently closed estuaries can build elevations to keep pace with sea-level rise. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 257, 107386 (2021).
- Tolman, H. The Wavewatch III development group user manual and system documentation of Wavewatch III version 6.07. tech. Tech. Rep., Note 333, March 2019.
- NOAA/NWS/NCEP/MMAB. (2019).
- Sheremet, A., Guza, R. T., Elgar, S. & Herbers, T. H. C. Observations of

nearshore infragravity waves: Seaward and shoreward propagating components.

*Journal of Geophysical Research: Oceans* 107, C8 (2002).

Symonds, G., Huntley, D. A. & Bowen, A. J. Two-dimensional surf beat: Long wave generation by a time-varying breakpoint. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 87, 492–498 (1982).

Vos, K., Harley, M. D., Splinter, K. D., Simmons, J. A., Turner, I. L.: Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Engineering*, 150, 160-174 (2019).

Wheeler, D. C., Giddings, S. N., Merrifield, M., & Pawlak, G. (2025). Infragravity frequency wave-driven bottom boundary layer turbulence in shallow estuaries. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 130(3), e2024JC021284.

Williams, M. E. & Stacey, M. T. Tidally discontinuous ocean forcing in bar-built estuaries: The interaction of tides, infragravity motions, and frictional control.

*Journal of Geophysical Research: Oceans* 121, 571–585 (2016).

Winder, S. Analog and digital filter design. Elsevier (2002).